



**HAL**  
open science

# ELABORATION D'UNE DÉMARCHE DE MISE EN ŒUVRE DE LA MAINTENANCE CONDITIONNELLE BASÉE SUR L'ANALYSE VIBRATOIRE

El Mehdi Semma, Ahmed Mousrij, Hassan Gziri

► **To cite this version:**

El Mehdi Semma, Ahmed Mousrij, Hassan Gziri. ELABORATION D'UNE DÉMARCHE DE MISE EN ŒUVRE DE LA MAINTENANCE CONDITIONNELLE BASÉE SUR L'ANALYSE VIBRATOIRE . MOSIM 2014, 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation, Nov 2014, Nancy, France. hal-01166665

**HAL Id: hal-01166665**

**<https://hal.science/hal-01166665>**

Submitted on 23 Jun 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# ELABORATION D'UNE DÉMARCHE DE MISE EN ŒUVRE DE LA MAINTENANCE CONDITIONNELLE BASÉE SUR L'ANALYSE VIBRATOIRE

E.M. SEMMA, A. MOUSRIJ, H. GZIRI

Laboratoire de Mécanique, Management Industriel et Innovation,  
FST de Settat, Université Hassan 1er, Maroc  
e\_semma@yahoo.fr, mousrij@gmail.com, hgziri@gmail.com

**RÉSUMÉ :** *L'analyse vibratoire reste un outil puissant et largement utilisé en industrie pour la surveillance des machines tournantes. Malgré les potentialités offertes par les appareillages de mesure en vibration grâce au progrès technologique, les entreprises qui pratiquent la maintenance conditionnelle basée sur l'analyse vibratoire (MCAV) affichent des performances en dessous des attentes, en termes de disponibilité machine. Notre travail consiste alors à élaborer une démarche de mise en œuvre de la MCAV prenant en considération les clés de la réussite et évitant les causes d'échec. Nous avons mené une analyse de trente années de pratique de la MCAV, au sein d'une grande entreprise marocaine dans l'industrie chimique, via une démarche collective appelée DCA (Diagnostic Court Autonome) et nous avons aussi réalisé une enquête auprès d'experts nationaux et internationaux dans le domaine de la MCAV. La synthèse de ces études nous a mené à proposer une démarche globale et structurée qui se décline en cinq phases : état des lieux, étude de faisabilité, phase préparatoire, phase de mise en place et phase d'évaluation et d'amélioration.*

**MOTS-CLÉS :** *Maintenance conditionnelle, Analyse vibratoire, Organisation de la maintenance, Implantation de l'analyse vibratoire, DCA.*

## 1 INTRODUCTION

L'analyse vibratoire est une technique de la maintenance conditionnelle particulièrement adaptée aux machines tournantes. Son objectif est la surveillance de l'état de fonctionnement de ces machines par analyse de signaux vibratoires en certains points de mesure préalablement définis. Néanmoins, cette technique relève du domaine de spécialistes vu la spécificité des systèmes à surveiller avec leurs anomalies probables, leurs exigences de coût et de sécurité, la diversité des moyens de mesure et de traitement, ainsi que la difficulté du diagnostic des spectres mesurés. Malgré l'évolution technologique des outils de mesure et d'analyse vibratoire ces dernières années, il existe un réel décalage entre les potentialités d'investigation et de surveillance offertes par ces outils et la plupart des pratiques sur le terrain. En outre, le diagnostic et l'interprétation des données de la mesure vibratoire reste difficile à réaliser correctement. Tout dépend de l'organisation, de l'expérience et de la compétence pour bien effectuer l'analyse (UGECHI et al., 2009). Pour réussir l'instauration d'une politique de surveillance efficace, une démarche rigoureuse s'avère alors nécessaire pour surmonter ces difficultés et éviter les causes d'échec de sa mise en œuvre (Chaib, 2006).

Les programmes et les procédures de mise en œuvre proposés par les chercheurs portent sur des installations spécifiques et se focalisent généralement sur le volet technique (Garg and Deshmukh, 2006). Par conséquent, ces procédures ne présentent pas de caractère générique

permettant de généraliser leur mise en œuvre. Beaucoup de programmes de maintenance conditionnelle basés sur l'analyse vibratoire, mis en application, donnent des résultats jugés insuffisants et en dessous des espérances. Ces programmes de mise œuvre se heurtent à un problème purement organisationnel, logistique et culturel (Boulinger et Pachaud, 2007), (Belhour, 2008). D'autant plus qu'il n'y a pas de normes traitant la mise en place de la maintenance conditionnelle basée sur l'analyse vibratoire.

Parmi les politiques de maintenance dont la mise en œuvre a été largement traitée en littérature et dont l'implantation a été réussie avec succès dans différents secteurs industriels, nous citerons la TPM (Total Productive Maintenance) (Nakajima, 1988), (Chand and shirvani, 2000) (Cigolini et Turco, 1997), (Cooke, 2000), (Eti et al, 2004), (Sun et al, 2003), (Tsang et Chan, 2000) et la MBF (Maintenance Basée sur la Fiabilité) (Overman, 2002), (Moubray, 1997), (Zwingelstein, 1996). Par contre la littérature sur la mise en œuvre de la maintenance conditionnelle est beaucoup moins abondante.

(Bengtsson, 2007) a proposé une démarche d'implantation de la maintenance conditionnelle en quatre phases successives, l'étude de faisabilité, la phase d'analyse, la phase de mise en place et la phase d'évaluation. L'auteur met l'accent sur un ensemble de facteurs clés de la réussite lors du processus d'implantation tels que le soutien managérial, la formation du personnel, la bonne communication entre les

différentes parties prenantes et la motivation. Par contre, la démarche proposée ne prend pas en considération les spécificités des techniques utilisées dans la maintenance conditionnelle (Analyse vibratoire, analyse d'huile, thermographie,...). Par exemple, la complexité de l'analyse vibratoire rend sa mise en place difficile par rapport au suivi des paramètres de marche des process industriels en tant qu'outil de surveillance (Boulenger et Pachaud, 2007).

En ce qui concerne les cas d'étude industriels, peu de publications ont traité l'aspect managérial que ça soit au niveau des programmes de la maintenance conditionnelle ou au niveau des difficultés rencontrées lors de son implantation. (Veldman, 2011) a procédé à une investigation auprès de firmes industrielles néerlandaises qui pratiquent la maintenance conditionnelle. Toutes ces entreprises adoptent une approche spontanée de la maintenance conditionnelle portée plutôt sur le diagnostic en se basant sur le savoir faire des techniciens. C'est une approche réactive qui s'avère suffisante lorsque la fiabilité et la disponibilité exigées sont faciles à atteindre mais elle peut conduire à des arrêts ou à des interventions inutiles. D'autre part, il n'est pas clair comment les problèmes sont identifiés et comment les décisions sont prises.

Par ailleurs, peu de travaux ont traité la mise en œuvre de la Maintenance Conditionnelle basée sur l'Analyse Vibratoire. (Courrech et Eshleman, 2002) proposent un programme de mise en place de la MCAV en huit étapes successives focalisées sur l'aspect technique. Cependant, ce programme néglige l'aspect managérial qui définit les actions de pilotage par les responsables ainsi que l'engagement de la direction pour la réussite d'une telle maintenance. (Boulenger et Pachaud, 2007) ont proposée une démarche de mise en œuvre de la MCAV en quatre phases : l'étude de faisabilité, les choix, le démarrage du programme et la pratique de surveillance globale. La démarche néglige la faisabilité organisationnelle et ne met pas l'accent sur l'étude de l'état des lieux préalablement à l'étude de faisabilité.

L'objectif de notre travail est de proposer une démarche de mise œuvre de la maintenance conditionnelle basée sur l'Analyse Vibratoire traitant les différents aspects : technique, opérationnel, organisationnel et financier, nécessaires pour la réussite de l'implantation de ce type de maintenance. Pour l'élaboration d'une démarche globale prenant en considération les clés de la réussite et évitant les causes d'échec, nous avons mené deux études complémentaires :

- Une analyse de trente années de pratique de la maintenance conditionnelle par analyse vibratoire, au sein d'une grande entreprise marocaine dans le domaine de la transformation chimique, via une démarche collective appelée DCA (Diagnostic Court Autonome) auprès des parties prenantes dans l'objectif d'identifier les handicaps ainsi que les éléments clés de la réussite de

l'implantation d'une telle politique de maintenance.

- Une enquête auprès d'experts nationaux et internationaux dans le domaine de la MCAV pour recueillir leurs avis sur les facteurs clés de la réussite ainsi que les lignes directrices à suivre pour mener à bien un projet d'implantation d'une telle politique de maintenance.

La synthèse de ces études nous a mené à proposer une démarche globale et structurée qui se décline en 5 phases : état des lieux, étude de faisabilité, phase préparatoire, phase de mise en place et phase d'évaluation et d'amélioration.

À la différence des démarches rencontrées dans la littérature qui commencent par une étude de faisabilité, notre démarche propose préalablement, grâce aux études réalisées, une phase supplémentaire qui décrit l'état des lieux pour faire un constat de l'existant sur la performance du parc machine et la compétence du personnel de maintenance. Elle propose aussi d'évaluer la maturité de l'organisation de la fonction maintenance avant de lancer un projet de mise en œuvre de la MCAV.

## **2 ANALYSE ET ÉVALUATION DE LA MISE EN ŒUVRE DE LA MCAV AU SEIN D'UNE GRANDE ENTREPRISE MAROCAINE DE TRANSFORMATION CHIMIQUE**

Notre étude a porté sur une grande entreprise marocaine de transformation chimique qui pratique la MCAV depuis 30 ans. Malgré sa longue expérience en Analyse Vibratoire et l'engagement du personnel de maintenance, les résultats obtenus par la mise en place de la MCAV sont loin des objectifs escomptés. Dans un premier temps, nous avons réalisé un audit sur l'efficacité de la pratique de la MCAV. On a pu déceler un manque d'organisation du service chargé de la surveillance et du diagnostic vibratoires. Une évaluation quantitative de la pertinence du programme de la MCAV, durant les années 2011 et 2012, a permis d'enregistrer un taux de 93% des pannes mécaniques qu'on pouvait détecter par la surveillance vibratoire (Semma et al., 2013).

Pour diagnostiquer cet échec de la mise en place de la pratique de la MCAV au sein de l'entreprise étudiée, nous avons adopté la démarche DCA qui nous a permis de faire des analyses bien détaillées pour identifier, avec toutes les parties prenantes, les handicaps et les opportunités afin de mieux réussir le chantier de la mise en œuvre de la MCAV.

### **2.1 Présentation de l'entreprise étudiée :**

L'entreprise étudiée est composée de trois usines de transformation chimique. Chacune se caractérise par des process industriels complexes exploitant un parc machine composé de turbines, de turbo-alternateurs, de tur-

bosoufflantes, de broyeurs, de pompes, de ventilateurs, de systèmes d'engrenage et d'autres machines de grandes tailles. Afin de maîtriser la disponibilité de ses installations, l'entreprise a opté pour une politique de maintenance décentralisée intégrant les différents types de maintenance. Consciente de l'importance de la MCAV pour la surveillance de ces installations, l'entreprise s'est engagée dans cette démarche depuis une trentaine d'années en levant les fonds nécessaires pour acheter des appareils de haute technologie, sous-traiter la mesure, le diagnostic vibratoire et l'accompagnement pour un éventuel transfert d'expertise.

## 2.2 Présentation de la démarche DCA :

Fruit d'un travail collaboratif et collectif, testé dans différents contextes, le DCA a fait ses preuves en termes d'efficacité. Il permet de dégager réellement et avec une remarquable maîtrise du temps une vision riche sur laquelle des décisions stratégiques peuvent être prises. Il est une combinaison originale de six analyses transformant les préoccupations individuelles liées à un moment donné en une réelle réflexion commune sur le futur (Russon et al., 2010). Pour déployer cette démarche, nous avons constitué un groupe de travail intégrant les différentes parties prenantes de la MCAV au sein de cette entreprise. Ce groupe est formé de 5 agents d'exécution, 3 agents de préparation et de planification ainsi que deux représentants des sites d'exploitation. Les informations collectées selon les étapes de la démarche nous ont permis de faire 4 analyses de la situation actuelle et de la situation souhaitée de la MCAV au sein de cette entreprise : l'analyse directe, l'analyse des dangers et des opportunités, l'analyse de la couverture des forces et des faiblesses et l'analyse des thèmes dominants.

Les conclusions sont, à chaque analyse, légèrement différentes et complémentaires. Leur combinaison permet de nuancer, de réfléchir et d'articuler les apports des uns et des autres de manière plus riche, plus variée que ne le pourrait un dialogue habituel entre ces personnes (Russon et al., 2010).

## 2.3 Déploiement de la démarche DCA :

### 2.3.1 Collecte des informations

La première étape de cette démarche consiste à la collecte des informations auprès des participants, concernant leurs avis sur la situation actuelle et la situation future voulue de la MCAV au sein de l'entreprise.

#### ❖ Collecte 1 : informations sur la situation actuelle de la MCAV :

Nous faisons une première collecte d'informations sur post-its en six tours de table pour se renseigner sur l'état actuel de la MCAV. Le nombre et la couleur des post-its remis aux participants varient à chaque tour de table. Les participants remplissent leurs post-its respectifs en

transcrivant leurs idées sur les questions regroupées dans le Tableau 1.

Question posée à chaque tour de table	Nombre post-its	Couleur post-its
Six difficultés que connaît aujourd'hui la structure des cellules de l'analyse vibratoire ?	6	Jaune
Cinq améliorations à apporter par rapport aux difficultés de cette forme de maintenance ?	5	Vert
Quatre obstacles qui empêchent de changer malgré l'existence des pistes ?	4	Orange
Trois leviers qui font que, malgré les obstacles, les cellules de vibration existent ?	3	Bleu
Identification de deux livrables qui peuvent aider à mieux fonctionner (toute forme matérielle : équipement, objets, documents, locaux, procédures, vidéos, supports ...)?	2	Rose
Le premier pas à faire dans la bonne direction pour sortir de la situation actuelle ?	1	Mauve

Tableau 1 : Les informations demandées sur la situation actuelle de la MCAV

#### ❖ Collecte 2 : informations sur la situation future voulue de la MCAV :

De la même manière, la deuxième collecte d'informations sur post-its en six tours de table permet d'imaginer ce que nous désirons être dans trois ans en matière de la MCAV (Tableau 2). A chaque tour de table, la vision s'enrichit de piliers et de composantes pour soutenir les développements souhaités.

Question posée à chaque tour de table	Nombre post-its	Couleur post-its
Que serons-nous devenus dans 3 ans en matière de maintenance conditionnelle par analyse vibratoire?	1	Mauve
Qu'est-ce qui fera durer cette réussite?	2	Bleu
Qu'aurons-nous développé comme outils, habiletés, méthodes, reconnaissances, certification, compétences, habitudes ou agilités pour rendre durable cette réussite?	3	Rose
Quand nous aurons réussi ce changement, à quoi devons-nous particulièrement faire attention ? Quels seront les risques encourus?	4	Orange
Que devons-nous faire pour anticiper et faire face à ces risques afin de nous y préparer au mieux?	5	Vert
Pour parvenir à cet objectif, six points faibles qu'il nous faudra apprendre à dépasser d'ici là?	6	Jaune

Tableau 2. Les informations demandées sur la situation future de la MCAV

Après la collecte des informations sur l'état actuel et l'état souhaitée, la deuxième phase sera consacrée à l'analyse de ces données afin d'approfondir le diagnostic de la situation actuelle de la MCAV.

### 2.3.2 Analyse Directe des données :

Nous abordons maintenant la première couche d'analyse de cette récolte d'informations que nous appellerons « Analyse Directe ». Nous regrouperons tout d'abord les post-its produits par l'ensemble des participants. Nous les rapprochons par couleurs, c'est-à-dire par nature d'information (les verts avec les verts, les jaunes avec les jaunes et ainsi de suite). Nous obtenons donc six groupes présentés dans la Figure 1.



Figure 1 : Regroupement des informations collectées en six groupes

Une première lecture des post-its nous permet de dégager les thèmes selon lesquels nous allons dépouiller les données collectées. Les sept thèmes ainsi dégagés sont :

Communication, Compétence, Formation, Matériel, Motivation, Organisation, Technique. Couleur par couleur, nous allons trier et regrouper les post-its portant sur un même thème. La synthèse de cette analyse directe est présentée dans la Figure 2.

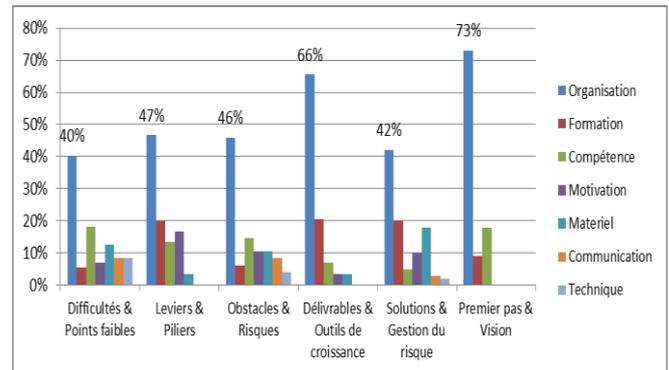


Figure 2. Synthèse de l'analyse directe de données

Après avoir identifié les obstacles et les difficultés à travailler, les perspectives, les pistes d'amélioration et les outils de la réussite, la Figure 2 montre que les thèmes incriminés dans l'échec de la mise en place de la MCAV au sein de l'entreprise étudiée sont : l'Organisation, la Formation et la Compétence du personnel. En particulier, les pourcentages illustrés sur la Figure 2 montrent que l'organisation est le pilier majeur de la réussite ou de l'échec de la MCAV.

### 2.3.3 L'analyse thématique :

Cette analyse porte simplement le nom de « thématique » car on y regroupe les données collectées qui présentent une ressemblance de thème, quelle que soit la couleur des post-its. L'enjeu est d'établir les grandes préoccupations du moment et de dégager les premiers thèmes de travail pour l'avenir. La synthèse de cette analyse thématique est présentée dans la Figure 3.

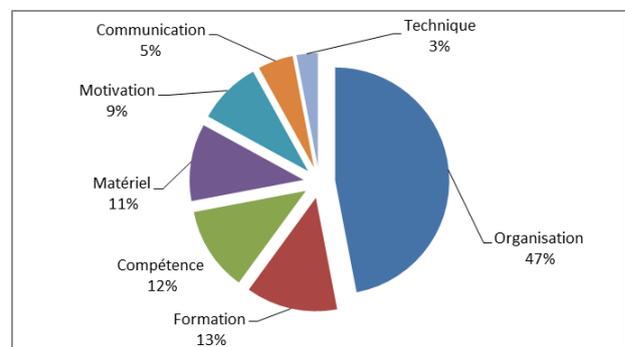


Figure 3 : Synthèse de l'analyse thématique de données

A l'instar de l'analyse précédente, l'analyse thématique confirme que l'organisation est de loin l'élément clé de la réussite de la mise en œuvre de la MCAV.

### 2.3.4 L'analyse de la couverture des forces et des faiblesses

Nous abordons maintenant une troisième couche d'analyse de cette récolte d'information. Nous

l'appellerons « analyse de la couverture des forces et des faiblesses ». Nous tenons ici à cerner le niveau de couverture des « difficultés énoncées » par « solutions proposées » et vice versa. Il s'agit de savoir si le groupe qui définit des problèmes trouve aussi des solutions à ces

problèmes. On va donc rapprocher l'ensemble des post-its qui reprennent les difficultés ressenties et voir en quoi l'ensemble des post-its reprenant les solutions ou pistes de travail y apportent ou non une réponse. La synthèse de cette analyse est présentée dans le tableau 3.

Les difficultés énoncées	Solutions proposées
Pas d'historique des équipements	Instruire les fiche machines
La cellule vibratoire n'est pas organisée	Organisation de la mesure par un temps suffisant
Mauvaise communication entre la cellule d'inspection et le service de maintenance	Développer la communication
La non maîtrise du diagnostic vibratoire	Formation continue avancée
La fréquence des rondes n'est pas bien déterminée	Revoir la fréquence de mesure
Manque de formation	Formation continue poussée
Manque de procédure de vibration	Elaboration des procédures et formaliser les processus en question
Manque de formation pour les sous-traitants	travailler la sous-traitance
Manque de compétence dans le domaine	Former les agents sur la façon de travailler
Absence des experts dans la vibration	Procéder au recrutement des experts
Manque d'accompagnement	Transfert d'expertise entre les agents et l'accompagnateur
Non motivation des inspecteurs	Motiver l'équipe de la cellule
Mauvais suivi des équipements par l'analyse vibratoire	Revoir les programmes
Manque de responsabilité pour arrêter les installations suite aux mesures	Définir les responsabilités et les pouvoirs

Tableau 3 : Synthèse de l'analyse de la couverture des forces et des faiblesses

Malgré le nombre et la diversité des difficultés énoncées, les participants ont pu aussi proposer des solutions. Cette analyse va nous permettre d'identifier les difficultés à surmonter et d'y apporter les solutions appropriées lors de l'élaboration de la démarche de la mise en œuvre de la MCAV.

### 2.3.5 Analyse des risques et des opportunités (analyse SWOT)

L'outil SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats), très largement utilisé dans de nombreux domaines, permet d'analyser, de diagnostiquer et de dé-

crire un état de l'existant.

Pour cette analyse, nous avons identifié, ensemble, les « acteurs, internes & externes », les « opportunités » et les « menaces », possibles pour les quatre thèmes incriminés lors de l'analyse thématique : Organisation, Formation, Compétence et Matériel. Il s'agit de cerner plus précisément l'influence possible de l'environnement sur notre projet de mise en œuvre de la MCAV par une analyse des opportunités et des menaces liées à notre contexte.

La matrice SWOT (figure 4) synthétise l'ensemble des menaces et des opportunités pour notre projet.

	Points forts	Point faibles
<b>Acteurs internes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les décideurs sont conscients par l'importance de transfert d'expertise entre les agents et l'accompagnateur</li> <li>- Il y a une expérience de la sous-traitance au sein de l'entreprise</li> <li>- Les décideurs donnent une importance à la formation</li> <li>- L'essentiel pour l'entreprise est d'acheter un appareil rentable de haute technologie</li> <li>- Les chefs de service de maintenance favorisent des formations pratiques.</li> <li>- Il y a des audits qui sont planifiés dans le système de management qualité.</li> <li>- Si un matériel de contrôle vibratoire de bonne qualité apparaît dans le marché, les responsables peuvent le commandé.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Manque d'organisation de l'accompagnement</li> <li>- Manque d'organisation de la sous-traitance</li> <li>- Il n'y a pas des procédures qui gèrent la relation entre tous les intervenants dans une installation (planificateur, agent de production, rondier, exécutant de l'intervention)</li> <li>- Les descriptifs techniques ne contiennent pas beaucoup de spécifications pour commander un matériel adapté avec les installations</li> <li>- L'ingénierie de formation ne se fait pas comme il faut</li> <li>- Mauvais choix des auditeurs</li> <li>- Le bureau de méthodes qui est responsable du suivi de l'évolution de la technologie des appareils de mesure néglige la veille technologique</li> </ul>
<b>acteurs externes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Il existe des experts qui peuvent faire un transfert expertise</li> <li>- L'accompagnement ne coûte pas cher</li> <li>- Il existe des entreprises qui ont réussi la sous-traitance de la mesure vibratoire</li> <li>- L'existence d'un plan de formation sur des thèmes transversaux et spécifiques</li> <li>- L'existence des fournisseurs reconnus dans ce domaine</li> <li>- Il y a des experts qui maîtrisent le volet formation</li> <li>- L'existence des auditeurs spécialisés dans le domaine vibration</li> <li>- Le service achat ne retarde pas l'achat d'un appareil</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Non atteinte des objectifs de l'accompagnement</li> <li>- Sous-traitance de l'accompagnement à un organisme non reconnu</li> <li>- Mauvaise organisation de la sous-traitance</li> <li>- Sous-traitance de l'analyse vibratoire à un organisme non qualifié</li> <li>- Le service de production n'arrête pas l'installation pour réparation suite à un diagnostic vibratoire</li> <li>- Fournir des appareils dépassés techniquement</li> <li>- Fournir des formations de mauvaise qualité</li> <li>- Validation des procédures sans impact positif sur les cellules de vibration</li> <li>- Achat des appareils dépassés techniquement</li> </ul>

Figure 4 : Matrice SWOT

En conclusion, ce cas d'étude industriel, nous a permis d'identifier les éléments d'échec et de réussite de la mise en place de la MCAV. Pour enrichir notre étude, dans l'objectif d'élaborer une démarche structurée et globale d'implantation de la MCAV, nous avons réalisé une enquête auprès d'experts nationaux et internationaux visant à définir les facteurs clés et les décisions prioritaires à prendre en considération lors d'un tel projet.

### 3 UNE ENQUÊTE AUPRÈS D'EXPERTS DANS LE DOMAINE DE LA MCAV

Pour mener cette enquête, nous avons sollicité 15 experts nationaux et internationaux dans le domaine de la MCAV pour demander leurs avis concernant les facteurs clés et les décisions prioritaires nécessaires pour la réussite de l'implantation d'une MCAV. Les questions posées sont formulées ainsi :

- Quels sont les facteurs clés de la réussite de la mise en œuvre de la maintenance conditionnelle par l'analyse vibratoire ?
- Quelles sont les décisions prioritaires à prendre pour mener à bien une mise en place d'une maintenance conditionnelle par l'analyse vibratoire ?

Après la collecte des réponses, nous avons procédé à un dépouillement des avis émis par nos experts. Nous avons alors pu identifier 22 facteurs clés et 9 décisions prioritaires nécessaires pour la réussite de la mise en œuvre de la MCAV. Ensuite, nous avons classé les facteurs clés (Tableau 5) et les décisions prioritaires (Tableau 6) selon le nombre de répondants.

Facteurs	Nombre de répondants
L'évaluation et l'amélioration	7
Création et mise à jour des dossiers des machines	6
Etat de l'existant en matière de ressources	5
Etablissement régulier des rapports de diagnostic	5
Choix des équipements et des instruments de mesure	5
Choix des acteurs	5
Etat de l'existant en matière d'équipements	4
Sélection des Paramètres de surveillance	3
Les procédures de mise en place	3
L'engagement de la direction	3
Formation et certification	3
Définition des responsabilités	3
Appel à des experts pour l'accompagnement	3
Respect et mise à jours du calendrier de maintenance	2
Ingénierie de formation	2
Etude techno-économique	2
Etude de la performance des machines tournantes	2
Etude de la Maturité organisationnelle	2
Classification des machines	2
Analyse des pannes	2
Définition des objectifs	1
Collecte, traitement et archivage des données	1

Tableau 5 : Classement des facteurs clés selon le nombre de répondants

Principales décisions	Nombre de répondants
Mettre un plan de formation pour certifier les chargés de l'Analyse vibratoire	8
Standardiser les types des appareils de mesure et les logiciels de traitement	5
Faire un suivi régulier des équipements par des dossiers machines complets	5
Commencer par le suivi des machines critiques	5
Commencer l'implantation par une étude de l'existant	5
Programmer des rencontres périodiques entre les cellules chargées de l'Analyse vibratoire	3
Commencer par l'accompagnement	3
Respecter le planning de mesure et exploiter le feed-back des contrôles des machines analysées	2
Appliquer des procédures pour la mise en place, l'évaluation et l'amélioration	2

Tableau 6. Classement des décisions prioritaires selon le nombre de répondants

**Synthèse de l'enquête :** Nous avons regroupé les facteurs clés et les décisions prioritaires selon l'ordre chronologique des phases d'un processus de mise en œuvre d'une démarche de MCAV que nous projetons d'élaborer. Les 5 phases ainsi proposées sont : Etude de l'état des lieux, Etude de la faisabilité, Phase préparatoire, Phase de la mise en place et Phase d'Evaluation et d'amélioration. A la différence des différentes démarches de la MCAV proposées dans la littérature, les répondants mettent l'accent sur l'importance de la première phase concernant l'état des lieux pour faire un constat de l'existant sur la performance du parc machine et la compétence du personnel de maintenance. L'enquête a montré aussi l'importance de la phase « Evaluation & Amélioration » pour l'instauration d'un système d'évaluation à chaque étape du processus de la démarche dans un esprit d'amélioration continue.

### 4 DÉMARCHE DE MISE EN ŒUVRE DE LA MCAV :

L'état de l'art sur la mise en œuvre de la MCAV, enrichie des deux études réalisées, nous a permis de développer une démarche articulée en cinq phases complémentaires, figure 5, visant à accompagner les industriels dans leur projet de mise en place de la MCAV.

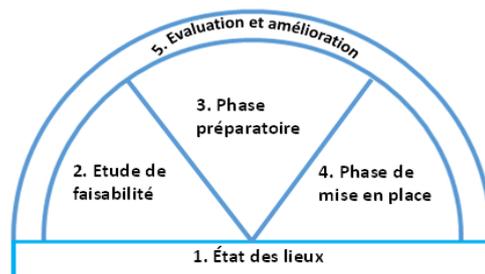


Figure 5 : Les différentes phases de la démarche de mise en œuvre de l'analyse vibratoire

La figure 6 présente la synthèse du processus d'implantation de la démarche proposée sous forme de logigramme.

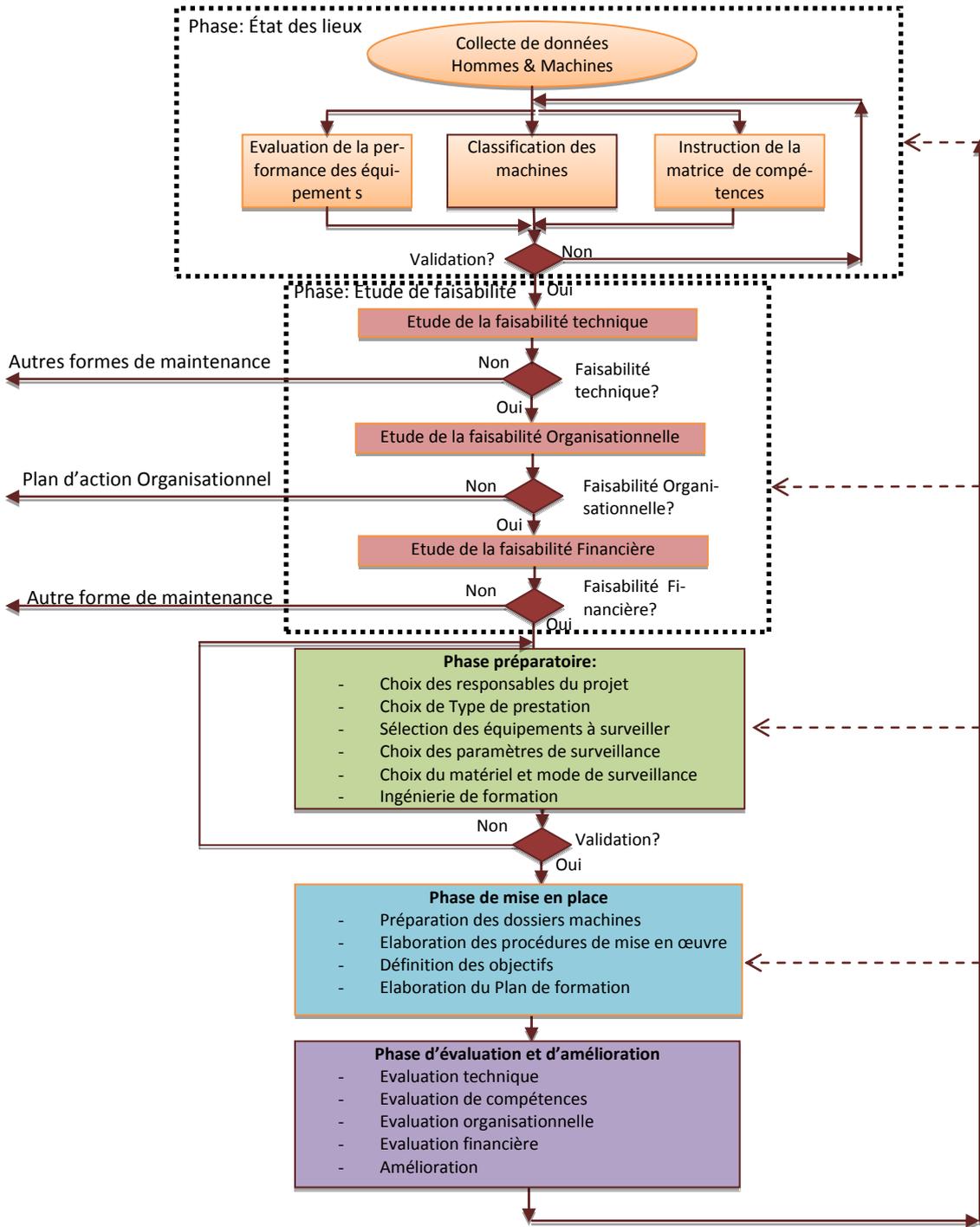


Figure 6 : Démarche de mise œuvre de la MCAV

#### 4.1 Phase 1 : Etat des lieux

La première phase consiste à dresser un état des lieux de l'existant visant à collecter des données sur l'historique et la performance de nos machines et à établir un bilan des compétences du personnel de maintenance. Pour ce faire, il faut :

- Faire une classification multicritère des machines tournantes intégrant : la fréquence d'arrêt, le temps d'arrêt, le coût de maintenance corrective et l'impact de l'arrêt de la machine sur la production (Stadhouders, 2011).
- Etablir un historique des pannes dues aux défauts de vibrations (Balourd, désalignement, défaut roulement,...) des composants concernés par l'analyse vibratoire (roulements, arbre, accouplement, réducteurs, ..).
- Construire une matrice de compétences intégrant les acteurs du projet de mise en œuvre de la MCAV et leurs compétences.

Le résultat de cette phase permet de donner à la direction des informations objectives sur l'état des lieux de l'existant et permettra par la suite d'assurer un suivi régulier de la performance du parc machine et du développement des compétences du personnel.

#### 4.2 Phase 2 : Etude de la faisabilité

Il s'agit dans cette phase de vérifier la faisabilité du projet de mise en œuvre de la MCAV sur le plan technique, organisationnel et financier.

- Faisabilité technique : Pour cela il est indispensable de définir le pourcentage des machines concernées par l'analyse vibratoire, connaître les vitesses de rotation (pour les petites vitesses, en dessous de 250 tours par minute, l'analyse vibratoire est difficile à manier) et évaluer les risques et les difficultés d'accès aux points de mesure. Si techniquement l'analyse vibratoire n'est pas faisable, il faut penser à d'autres outils de la maintenance.
- Faisabilité Organisationnelle : Avant de lancer le projet de mise en œuvre, il faut d'abord évaluer la maturité de l'organisation de la fonction maintenance au sein de l'entreprise. L'audit reste un outil puissant pour faire cette évaluation (Laloux, 2009).
- Faisabilité Financière : Il faut estimer le coût de la surveillance et le coût de non surveillance (coût direct et indirect des pannes, appareillage, formation, taux des rebuts, perte d'énergie, perte des clients,...) afin d'évaluer la rentabilité du programme MCAV. En cas de non rentabilité, il faut penser à une autre forme de maintenance.

#### 4.3 Phase 3 : Phase préparatoire :

A l'issue de l'étude de faisabilité, la direction doit lancer le projet en mettant en place l'organisation technique,

humaine et financière et en établissant un calendrier de mise en place. Les grandes orientations seront arrêtées dans cette phase et peuvent se résumer aux points suivants :

- Définition des rôles et responsabilités de tous les acteurs pour chaque étape du projet.
- Choix du type de prestation : Selon la taille du parc machine et les compétences internes, l'entreprise peut choisir entre l'internalisation ou la sous-traitance totale ou partielle de la surveillance et du diagnostic. Si la MCAV est une activité récente dans l'entreprise, la sous-traitance de l'accompagnement est recommandée pour assurer un transfert d'expertise.
- Sélection des équipements critiques à surveiller selon la classification multicritère établie à la première phase.
- Choix des paramètres de surveillance : les indicateurs de surveillance, l'emplacement des capteurs, l'intervalle de mesure et le paramétrage du logiciel de suivi doivent être définis à ce stade.
- Choix du matériel et mode de surveillance : Le matériel de la surveillance vibratoire est lié au parc machine (les vitesses de rotation, la chaîne cinématique, etc.). Pour cette raison, on doit lister pour chaque machine, les capteurs, le type d'indicateurs de suivi et le type de diagnostic (périodique ou non). Ceci conditionne, avec la fiabilité exigée, le choix du matériel.
- Ingénierie de formation : il s'agit, ici, d'exploiter la matrice de compétences instruite au niveau de la première phase pour établir un plan de formation.

#### 4.4 Phase 4 : Phase de mise en place:

Après la préparation, la phase de mise en place se poursuit par :

- La création des dossiers machines qui sont indispensables pour assurer un bon suivi de vibration. Ces dossiers machines doivent être considérés comme une base de travail quotidienne et un réflexe pour toute intervention de diagnostic et de maintenance. chaque dossier doit contenir au moins:
  - La signature initiale de chaque composant surveillé par la MCAV,
  - L'historique des pannes, cartographie, analyse des pannes,
  - L'historique des modifications avec leurs justifications,
  - Le MTBF et le MTTR pour chaque composant important,
  - Le schéma cinématique et les points de mesure.
- La mise en place des procédures qui sont indispensables pour :
  - Gérer la matrice de compétences et la formation du personnel affecté à la cellule de vibration,
  - Planifier, mesurer, diagnostiquer et analyser les défauts de vibrations,

- Assurer un suivi de l'accompagnement et de la sous-traitance,
- Mettre à jour les dossiers machines,
- Mesurer et suivre les différents indicateurs.
- La mise en place des indicateurs de performance pour quantifier la réussite du programme et justifier les différents investissements. Par la suite, la direction doit définir des objectifs cohérents avec la politique de maintenance et la politique globale de l'entreprise et s'engager dans l'atteinte des résultats exigés en termes de fiabilité et disponibilité des équipements.
- La définition d'un plan de formation continue pour le développement des compétences des acteurs du projet.
- Analyse des pannes : tout dépassement de seuil doit être suivi d'un diagnostic approfondi afin d'identifier la gravité du défaut et les causes racines de ce dépassement. Les résultats du diagnostic doivent faire l'objet d'un retour d'expérience.

#### 4.5 Phase 5 : Evaluation et Amélioration:

C'est une phase très importante qui consiste à instaurer des indicateurs d'évaluation à chaque étape du processus d'implantation afin de s'assurer de la bonne exécution du projet et avoir un système d'évaluation fiable qui permet aux responsables de s'inscrire dans une démarche d'amélioration continue. L'évaluation doit porter sur tous les aspects, technique, organisationnel, financier et compétences des acteurs du projet. Le choix de ces indicateurs se fera de telle façon à rendre l'évaluation la plus objective possible.

## 5 CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons élaboré une démarche de mise en œuvre de la maintenance conditionnelle basée sur l'analyse vibratoire. Dans l'objectif de proposer une démarche globale et structurée, nous avons mené deux études complémentaires. D'abord une analyse bien détaillée, au sein d'une grande entreprise qui a une trentaine d'années de pratique de la MCAV, en adoptant la démarche DCA dans le but de décrire, d'analyser et diagnostiquer la MCAV au sein de cette entreprise. Le dépouillement des données collectées auprès des acteurs internes a permis d'incriminer en premier lieu la mauvaise organisation dans l'échec de mise en place de la MCAV. Par suite l'analyse SWOT a permis de synthétiser, sous forme d'une matrice, les menaces et les opportunités pour la réussite de la mise en œuvre de la MCAV.

D'autre part, nous avons réalisé une enquête auprès d'experts dans le domaine d'analyse vibratoire, cette investigation nous a permis de déceler et de hiérarchiser les facteurs clés et les décisions prioritaires à prendre en compte pour réussir un projet d'implantation d'une MCAV.

Ces deux études ont apporté quelques éléments de réponse à la problématique qui a initié ce travail de re-

cherche : Quelle démarche pour réussir la mise en place de la MCAV au sein d'une entreprise industrielle ? L'approche que nous avons alors adoptée dans notre travail consistait à intégrer la pratique et l'expérience, à travers les deux études réalisées, pour élaborer une démarche focalisée autant sur l'aspect technique que sur les autres aspects, financier, organisationnel et managérial. La démarche ainsi proposée est articulée en cinq phases : état des lieux, étude de faisabilité, phase préparatoire, phase de mise en place et phase d'évaluation et d'amélioration.

Dans le souci d'élaborer une démarche qui peut accompagner les industriels dans leur projet de mise en place de la MCAV, nous avons pris l'accord de la société dans laquelle nous avons mené notre première étude, pour implanter et valider cette démarche. Les travaux futurs consisteront alors à traduire chaque étape de notre démarche en un processus d'exécution bien détaillé, en élaborant les procédures de mise en place et les indicateurs d'évaluation garants de la réussite d'un tel projet.

## REFERENCES

- Belhour, S., 2008. *Contribution à l'optimisation de la maintenance prédictive Par l'utilisation du logiciel Omnitrend (système on line) cas : Cimenterie Hamma Bouziane*. Mémoire de magister, Université Mentouri-Constantine, Algérie.
- Bengtsson, M., 2007. *On condition based maintenance and its implementation in industrial setting*. Thèse, Mälardalen university, Suède.
- Boulenger, A. et C. Pachaud, 2007. *Analyse vibratoire en maintenance - Surveillance et diagnostic des machines*, Dunod, Paris.
- Chaib, R., 2006. *Contribution à l'optimisation de la maintenance conditionnelle par l'analyse vibratoire*. Thèse de doctorat, Université Mentouri-Constantine, Algérie.
- Chand, G. and B. Shirvani, 2000. *Implementation of TPM in Cellular Manufacture*. Journal of Materials Processing Technology, 103(1), pp. 149-154.
- Cigolini, G., and F. Turco, 1997. *Total Productive Maintenance Practices: A Survey in Italy*. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 3(4), pp. 259-272.
- Cooke, F., 2000. *Implementing TPM in Plant Maintenance: Some Organisational Barriers*. International Journal of Quality & Reliability Management, 17(9), pp. 1003-1016.
- Courrech, J. and R.L. Eshleman, 2002. *CONDITION MONITORING OF MACHINERY*. Fifth, New York.

- Eti, M., S.Ogaji and S. Probert, 2004. *Implementing Total Productive Maintenance in Nigerian Manufacturing Industries*. Applied Energy, 79(4), pp. 385-401.
- Garg, A. and S. Deshmukh, 2006. *Maintenance management: literature review and directions*. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 12(3):205-238.
- Laloux, G., 2009. *Management de la maintenance selon l'ISO 9001: 2008*, AFNOR, France.
- Moubray, J., 1997. *Reliability Centered Maintenance – RCM II (2nd edition)*, Industrial Press, New York.
- Nakajima, S., 1988. *Introduction to TPM: Total Productive Maintenance*. Cambridge, Productivity Press.
- Overman, R., 2002. RCM, *Condition Monitoring, or Both*. Maintenance Technology, pp. 25-28.
- Russon, C.H., O. James, P. Bufferne, D. Mullender et D. Giguere, 2010. *DCA stratégie mode d'emploi version 10.0*. IFEAS - Editions Scientifiques & Techniques, Paris.
- Semma, E.M., A. Mousrij, A. Echchatbi et H. Gziri, 2013. *Evaluation de la mise en œuvre de la maintenance conditionnelle basée sur l'analyse vibratoire : Etude de cas*. Workshop Optimisation des Systèmes, Amélioration Continue et Transformation des Entreprises. Marrakech - Maroc.
- Stadhouders, H., 2011. *A Framework for implementing Condition Based Maintenance based on Operational Data*. Thèse de doctorat, Eindhoven University of Technology, Netherlands.
- Sun, H., R. Yam and N. Wai-Keung, 2003. *The Implementation and Evaluation of Total Productive Maintenance (TPM) – An Action Case Study in a Hong Kong Manufacturing Company*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 22(3-4), pp. 224-228.
- Tsang, A. and P. Chan, 2000. *TPM Implementation In China: A Case Study*. International, Journal of Quality & Reliability Management, 17(2), pp. 144-157.
- Ugechi, C.I., E. Ogbonnaya, M. Lilly, S. Ogaji and S. Probert, 2009. *Condition-Based Diagnostic Approach for Predicting the Maintenance requirements of Machinery*. Engineering, Vol. 1 No. 3, pp. 177-187.
- Veldman, J., 2011. *Process Improvement for Engineering and Maintenance Contractors*. These, University of Groningen, The Netherlands.
- Zwingelstein, G., 1996. *La maintenance basée sur la fiabilité, Guide pratique d'application de la RMC, Contractors*. Maintenance, Editions HERMES, Paris.